



УДК 621.1.016

## О КИНЕТИКЕ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

### ON THE KINETICS OF COMBUSTION SPRAYING LIQUID FUEL DROPS.

**Кузнецов Прохор Сергеевич**, магистрант каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: prohor555@list.ru, Тел.: +7(908)905-22-24

**Голдобин Юрий Матвеевич**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: prohor555@list.ru. Тел.: +7(912)606-55-80

**Prokhor S. Kuznetsov**, Master student, Department «Теплоэнергетика i teplotехника», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: prohor555@list.ru, Ph.: +7(908)905-22-24

**Yuriy M. Goldobin**, Doctor Sc., Prof, Department «Теплоэнергетика i teplotехника», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: prohor555@list.ru. Ph.: +7(912)606-55-80

**Аннотация:** На основе кинетического уравнения и полученной скорости горения одиночной капли определены текущая и начальная функции распределения частиц по радиусам для автотельного режима горения. Скорость горения капли получена для случая кондуктивного подвода теплоты к поверхности капли от фронта горения. Получены выражения для расчета доли несгоревшего к текущему моменту времени топлива и автотельные параметры, необходимые для расчетов горения полидисперсных систем капель.

**Abstract:** Based on the kinetic equation and the resulting burning rate determined by a single drop of the current function and the initial distribution of the particle radius for the self-burning mode. Droplet burning rate obtained for the case of conductive heat supply to the drop of the combustion front surface. The expressions to calculate the percentage of unburned fuel to the current point in time and self parameters required for the calculation of combustion systems polydisperse drops.

**Ключевые слова:** горение; жидкое топливо; капли; полидисперсность; функция распределения; скорость горения; автотельные параметры.

**Key words:** combustion; liquid fuel; drops; polydispersity; distribution function, combustion rate, self parameters.

При сжигании распыленного жидкого топлива в различных устройствах определяющую роль играет кинетика горения капель в среде окислителя, разбавленного инертным газом и продуктами горения. Распыленное топливо представляет собой полидисперсную систему капель, поэтому кинетика горения должна рассматриваться для усредненных по функции распределения характеристик системы.

Полидисперсность капель при описании процесса горения будем учитывать на основании кинетического уравнения для функции распределения частиц по радиусам  $f(r_s, t)$  [1,2]

$$\frac{\partial f(r_s, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r_s} [f(r_s, t) * W(r_s, t)] = 0, \quad (1)$$

где  $W(r_s, t) = \frac{dr_s}{dt}$  - скорость горения единичной капли,  $r_s$  - радиус капли,  $t$  - время.

Для уравнения (1) выполняются соотношения  $dN(t) = N_0 f(r_s, t) dr_s$ ;  $f(r_s, 0) = f_0(r_s)$

$$\int_0^\infty f_0(r_s) dr_s = 1, \quad (2)$$

где  $N(t)$ ;  $N_0$  - текущее и полное (начальное) число частиц в начальный момент времени.  $f_0(r_s)$  - начальная функция распределения частиц по радиусам.

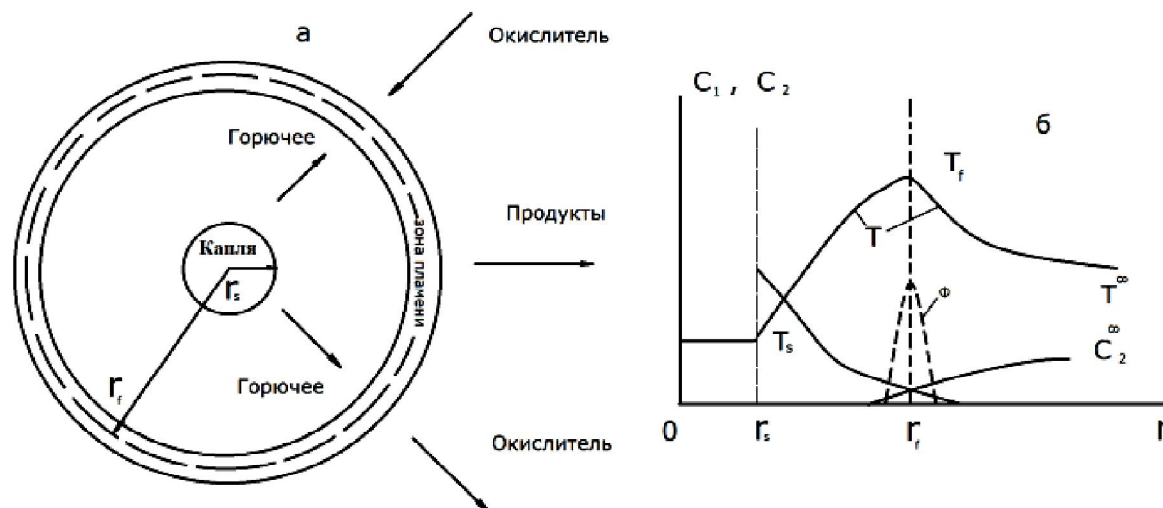


Рис. 1. Диффузионное горение капли

Для нахождения функции  $f(r_s, t)$  из уравнения (1) необходимо определить скорость горения единичной капли  $W(r_s, t)$ , которая может быть получена из квазистационарной теории диффузионного горения капли, разработанной Г.А. Варшавским и другими исследователями (В.М. Вильямс, В.В. Померанцевым, Б.И. Хайкиным и др.). В этих исследованиях принята следующая схема процесса теплообмена каплей, вброшенных в поток высокотемпературной среды, содержащей окислитель. Капли не дробятся, не взаимодействуют друг с другом, имеют нулевую относительную скорость и самовоспламеняются. Вокруг капли устанавливается узкая сферическая зона фронта горения. Часть теплоты реакции горения направляется к поверхности капли и затрачивается на испарение капли и прогрев паров топлива от температуры поверхности до температуры воспламенения, другая направлена на прогрев газов, находящихся снаружи фронта горения.

Механизм подвода теплоты из зоны горения к поверхности капли предлагается различный: молекулярный перенос; излучение, конвективный или кондуктивный перенос.

В данной работе для определения скорости горения использован кондуктивный перенос теплоты на испарение и горение капли жидкого топлива, предложенный в работах [3,4] Схематическое изображение диффузионного горения капли показано на рис.1:

а) модель горения капли топлива

б) распределение температуры и концентраций паров топлива ( $c_1$ ) и окислителя ( $c_2$ ) в пространстве

Принятые обозначения:

$r_s$  - радиус капли;  $r$  - текущий радиус от центра капли,  $r_f$  - радиус фронта горения.  $T_s$ ,  $T$ ,  $T_f$ ,  $T_{\infty}$  - температура поверхности капли, текущая от центра капли, фронта горения, среды вдали от капли соответственно,  $\Phi$  - фронт горения.

В узкой зоне диффузионного пламени скорость реакции неизмеримо больше скорости диффузии, поэтому можно считать, что в зоне горения (фронте пламени) весь окислитель расходуется и его концентрация равна нулю ( $C_r=0$ ), так же как расходятся все пары топлива и их концентрация также равна нулю ( $C_1=0$ ). Можно считать, что зона горения очень мала при  $r=r_f$

В такой постановке задачи можно принять, что в пространстве между каплей и фронтом, горения ( $r_s < r < r_f$ ) находятся пары топлива, которые нагреваются от температуры поверхности капли  $T_s$  до температуры воспламенения, которая при горении быстро даёт температуру фронта пламени  $T_f$ , т.е. можно считать что нагрев топлива происходит до температуры  $T_f$ . За фронтом пламени ( $r > r_f$ ) происходит кондуктивная передача теплоты на нагрев среды, окружающая каплю, в которой находится окислитель и продукты горения, разбавленные инертным газом.

Из уравнений баланса энергии для областей ( $r_s < r < r_f$ ) и ( $r > r_f$ ) получается выражение для расчета массовой скорости горения, из которого получена скорость изменения радиуса капли. Её можно представить в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от радиуса капли  $\Omega(r_s)$ , а другая только от времени  $w(t)$

$$W(r_s, t) = \Omega(r_s) \times w(t),$$

$$\text{где } \Omega(r_s) = \frac{1}{r_s};$$

$$w(t) = - \left\{ \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \ln \left[ 1 + \frac{c_1}{L} (T_f - T_s) \right] \right\} +$$

$$+\frac{\lambda_2}{\rho_1 c_2} \ln \left[ 1 + \frac{c_2(T_f - T_{cp})}{Q_R - L - c_1(T_f - T_s)} \right], \quad (3)$$

где,  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности среды до и после фронта горения;  $c_1, c_2$  – удельная теплоемкость среды до и после фронта горения;  $\rho_1$  – плотность жидкого топлива;  $L$  – теплота испарения топлива;  $Q_R$  – теплота сгорания.

Полагая, что в условиях интенсивного горения температура поверхности капли  $T_s$  близка к температуре кипения и пренебрегая теплотой, затраченной на прогрев капли, будем считать, что температура поверхности капли при её испарении постоянна и равна температуре кипения.

Температура пламени  $T_f$  в общем случае зависит от температуры среды  $T_{cp}$ , концентрации окислителя в газовой среде, коэффициента диффузии окислителя и других параметров. Однако, расчёты показывают, что разность температур ( $T_f - T_{cp}$ ) при горении в воздухе, разбавленном инертными газами составляет до 90% от максимально возможной ( $T_a - T_{cp}$ ), где  $T_a$  – адиабатная температура. Это означает, что температура  $T_f$  незначительно отличается от теоретической  $T_a$  и может быть определена через нее, т.е. её можно считать известной и постоянной. Поскольку она изменяется в процессе горения слабо. При постоянных средних коэффициентах теплопроводности и удельной теплоемкости временная часть скорости горения  $\omega(t)$  будет зависеть только от температуры среды  $T_{cp}$ .

Представление скорости горения в виде произведения двух функций (3) позволяет представить функцию распределения частиц по радиусам  $f(r_s, t)$  также в виде суммы ряда, состоящего из произведения двух функций, зависящих только от координат и временной частей. [2] Начиная с некоторого момента времени  $f(r_s, t)$  будет определяться только первым членом ряда то есть наступает своеобразный регулярный режим горения, который по времени будет основным. Тогда  $f(r_s, t)$  будет представлена уравнением

$$f(r_s, t) = A \Omega^{-1}(r_s) \exp[-a \int \Omega^{-1}(r_s) dr_s] \times \exp \left[ a \int_0^t \omega(t) dt \right], \quad (4)$$

где  $a$  – константа разделения,  $A$  – постоянная интегрирования

При  $t=0$  получаем начальную функцию распределения  $f(r_s, 0) = f_0(r_s)$

Подстановка в (4) конкретного вида функции  $\Omega(r_s)$  из (3) даёт

$$f(r_s, t) = A r_s \exp \left[ -\frac{a}{2} r_s^2 \right] \exp \left[ a \int_0^t \omega(t) dt \right] \quad (5)$$

Используя (5) можно ввести долю несгоревшего топлива  $y(t)$ , как отношение несгоревшей массы каплей  $M_k(t)$  к их начальной массе  $M_{k0}$

$$y(t) = \frac{M_k(t)}{M_{k0}} = \exp \left[ a \int_0^t \omega(t) dt \right] \quad (6)$$

и моменты порядка  $n$

$$\langle r_s^n \rangle = \frac{N_0}{N(t)} \int_0^\infty r_s^n f(r_s, t) dr_s \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) позволили получить автомодельные параметры полидисперсной системы при горении

$$a = \frac{2\Gamma(3/2)}{r_{s0}^2},$$

$$\langle r_s^n \rangle = \overline{r_{s0}^n} = \frac{(\overline{r_{s0}})^n \Gamma(\frac{n+2}{2})}{\Gamma^n(3/2)}, \quad (8)$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция;  $\langle r_s^n \rangle$  – усреднение по функции распределения;  $\overline{r_{s0}^n}$  – усреднение по начальной функции распределения;  $\overline{r_{s0}}$  – средний начальный размер

Полученные соотношения позволяют получить в дальнейшем усредненные характеристики полидисперсной системы; среднюю поверхность, объем, температуру среды и т.д.

#### Библиографический список

1. Бувеч Ю.А. О кинетике массообмена полидисперсной системы частиц с окружающей средой. ПМТФ. 1966 N1
2. Ясников Г.П. О кинетике автомодельного режима испарения полидисперсной системы капель. ИФЖ. 1982. т.42 N2. С.243-250
3. Кумагаи С. Горение М.: Химия. 1979. 255с.
4. Хайкин Б.И. Гетерогенное горение Сб.Тепломассообмен в процессах горения. Черноголовка: 1980. С.58-79.